



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



気候変動が積雪地域の水循環と水利用へ与える影響 について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 土木学会 公開日: 2019-03-13 キーワード (Ja): キーワード (En): climate change, snowy regions, hydrologic process, RCM20, water use 作成者: 川村, 一人, 中津川, 誠, 臼谷, 友秀 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009750

気候変動が積雪地域の水循環と水利用へ 与える影響について

EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON HYDROLOGIC PROCESS AND WATER USE IN A SNOWY REGION

川村一人¹・中津川誠²・臼谷友秀³

Kazuto KAWAMURA, Makoto NAKATSUGAWA and Tomohide USUTANI

¹学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

²正会員 工博 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

³正会員 (財) 日本気象協会 北海道支社 (〒064-8555 札幌中央区北 4 条西 23 丁目)

In snowy regions, snowmelt runoff is an important source of water for irrigation, domestic use and hydropower. However, climate change is expected to raise temperatures and reduce snowfall, which is expected to shorten the snow-melting season and decrease river discharge. In turn, this is expected to influence water use.

We calculated hydrologic process, including snow process, and their possible changes in the future for the Ishikari river catchment area by using the calculation method proposed by Usutani *et. al.* (2005). Mesh data of temperature and precipitation provided by the Japan Meteorological Agency's Regional Climate Model (RCM20) were applied to the simulation. The simulation suggests that shortages of irrigation water will occur, as a result of decreases in snowmelt runoff.

Key Words : *climate change, snowy regions, hydrologic process, RCM20, water use*

1. はじめに

北海道, 東北, 北陸などの積雪地域では, 雪は貴重な水資源であり, 灌漑用水や生活用水, 発電用水等の重要な供給源になっている. 融雪期の流出状況は気象の影響を強く受け, 気候変動による気温上昇を考えたとき積雪の減少, 融雪期の早期化や融雪水の減少が予想され, 水利用に影響を与えると懸念されている.

川村ら¹⁾は, 石狩川流域を対象として 2050 年と 2100 年を想定し, 2000 年からそれぞれ 1.8°C, 4.4°C の気温上昇を仮定した流出量の変化を予測しているが, その結果は融雪期 (4~6 月) の流出量の減少が顕著で, 2050 年で 4%, 2100 年で 23% の減少が起こり, 融雪のピークが 1 カ月ほど早くなると述べている. ただし, 気候変動による水資源への影響を明らかにするには気温上昇だけでは不十分で, 降水量の変化や降雪の減少, さらに気象要素の空間分布を考慮する必要がある.

将来の気象変化については, 各機関で気候モデルを開発し, 温暖化予測実験を行ってきたことで様々な予測結果が発表されている. また, 気候モデルの空間分解能が高解像度化することで地域的な温暖化影響評価を行えるようになった. その例として, 和田ら²⁾は気象庁・気象研究所の開発した地域気候モデル (MRI-RCM20) の結

果を用いて, 地球温暖化に伴う各地域の洪水・渇水リスクの評価を行っている. ただし, 流域単位で水資源や農業用水など現実的な影響評価を行うには, より高精度に気象変化を予測する必要があり, 気候モデル出力値のバイアス補正やダウンスケーリングが必要となってくる.

例えば, 藤原ら³⁾は RCM20 出力値と観測値の確率分布が一致するようにバイアス補正し, 利根川上流域の水資源に及ぼす影響を評価している. また, 立川ら⁴⁾は全球大気モデル (GCM) 出力データを分布型流出モデルの入力として, 最上川・吉野川流域の河川流況への影響を分析している.

このような背景から, 本報告では, 気象庁・気象研究所から提供された MRI-RCM20 (以降 RCM20) の再現結果 (1981~2000 年), 近未来予測値 (2031~2050 年), 21 世紀末予測値 (2081~2100 年) を用いて, 北海道内にある石狩川流域を対象に, 50 年後, 100 年後の水循環の変化を試算し, 流出状況の変化が流域内の水利用に与える影響を考察した. 具体的な手順は以下の通りである.

- 1) RCM20 の計算値に含まれるモデルバイアスを検出するために 1981~2000 年の観測値と再現結果を比較して, 補正手法を検討した.
- 2) RCM20 による 20km×20km の計算値を 1km×1km のメッシュにダウンスケールし, 観測値から作成した

積雪のない状態の地表面に供給される熱フラックスは、解析の対象が日平均状態の場合には微小項となることから、本解析では $Q_G=0W/m^2$ とした。一方、積雪がある場合、積雪面に供給される熱フラックスは、次式とした。

$$Q_G = Q_M + Q_B \quad (3)$$

ここで、 Q_M は積雪面の融雪に使われる熱量(W/m^2)、 Q_B は土壌から積雪面に供給される熱量(W/m^2)を表す。なお Q_B は、1mm/dの融雪に相当する熱量($-3.86W/m^2$)を与えた。式(3)より Q_M が決まり、融雪量 $M(mm/d)$ が求まる。融雪量 M は次式に示す。

$$M = 86,400Q_M / \ell_f \quad (4)$$

ℓ_f は氷の融解潜熱($=0.334 \times 10^6 J/kg$)である。また積雪深と積雪密度は本山ら⁹⁾の粘性圧縮理論により求めた。

(2) 流出量の計算

流出量の計算は、入力値となる降雨量、融雪量、蒸発散量に対応させて、メッシュ単位で行う。一つのメッシュでは、上流側のメッシュからの流量を河道追跡し、また、メッシュ内で生じる流出を計算し、これらの合計をメッシュの流出量とした。河道追跡には、kinematic wave式を変形した次の式を用いた。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{5}{3} \frac{i^{0.3} Q^{0.4}}{n^{0.6} B^{0.4}} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

ここで、 Q は流量、 i は疑似河道の勾配、 n はマニングの粗度係数、 B は川幅(m)を表す。演算は秒単位の時間ステップで行い、1日(86,400sec)後の値を出力している。 i は石狩川流域ランドスケープ情報⁹⁾から計算対象メッシュとその流下側メッシュの最低標高との標高差から決定した。 n は全域で0.05とし、 B は、山口ら¹⁰⁾の報告を参考に決定した。

メッシュ内での流出計算には、3段タンクモデルを用いた。モデルパラメータは、石狩川流域内のダムで同定したパラメータ¹¹⁾を基に、微修正を加えた値を全流域一律で計算を行った。

4. メッシュデータの作成

実測値の再現計算に用いる気象要素のメッシュデータは、Kriging法による補間手法など(臼谷ら⁶⁾)で作成した。補間手法の内訳を表-2に示す。

一方、将来予測計算では、気温と降水量にはRCM20の結果を用いた。この際、気温と降水量が水循環を支配する要因として着目し、その他の気象要素は両者に比べて感度が小さいとして、1998年の観測値から作成したデータを用いた。以下にRCM20の概要と補正手法を示す。

(1) RCM20の概要

RCM20は気象庁・気象研究所によりシミュレーショ

表-2 気象要素の補間方法

要素	補間方法
気温	バリオグラムを用いたKriging法
日射量	
日照時間	
降水量	経度、緯度、標高の線形回帰式+残差の距離重みによる補間
降雪深	
湿度	距離重みによる補間

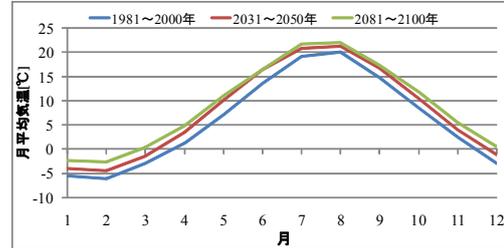


図-3 月別平均気温 (RCM20 値)

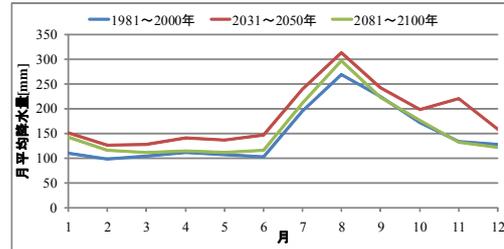


図-4 月別平均降水量 (RCM20 値)

ンされた水平解像度 20km の地域気候モデルである。計算内容は全球大気・海洋結合モデル (CGCM2, 大気: 経度 2.8 度×緯度 2.8 度メッシュ, 海洋: 経度 2.5 度×緯度 0.5~2 度) を境界条件として、1981~2000 年の 20 年間を再現したものである。さらに IPCC による経済重視で地域志向が強まると仮定した「SRES A2 シナリオ」に準拠して将来の気温や降水量の予測計算を行っている。データは1981~2000年の再現結果と2031~2050年、2081~2100年の予測実験結果を有している。

石狩川流域はRCM20の53メッシュの中に含まれており、その53メッシュの値を利用して解析を行った。

図-3は、RCM20の値を流域全体で平均した月平均気温である。現況再現結果に対して、全ての月で気温は上昇し、年間で50年後に1.8°C、100年後に3.0°Cの上昇と試算されている。一方、図-4はRCM20の値を流域全体で平均した月別降水量である。50年後、100年後ともに増加傾向が見られ、50年後は年間で約25%、100年後は約6%の増加となっている。

(2) RCM20の補正手法

気温、降水量ともに1kmメッシュから最も近いRCM20のメッシュの値を用いてメッシュデータを作成し、モデルに含まれるバイアスの補正手法に関して検討した。

a) 気温

気温には、標高依存性があるのでそれを利用して補正を行うこととした。モデルバイアスの検出とダウンスケールの手順を以下に示す。

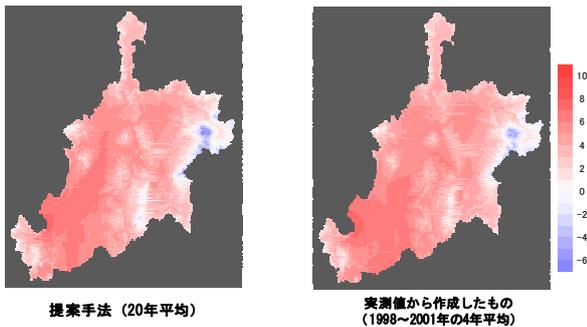


図-5 年平均気温分布図

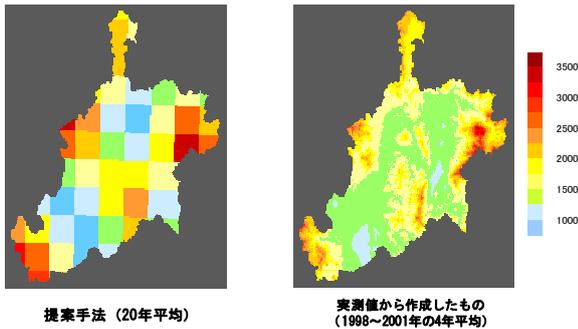


図-6 年間降水量分布図

- ① 流域とその近辺の気象官署、アメダスの月別平均データを 1981～2000 年の期間で収集し、気温減率（ $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ）で標高補正し、標高 0m のデータセットを作成する。
- ② 上記を Kriging 法で 1 ヶ月毎に $1\text{km}\times 1\text{km}$ 単位で空間補間する。
- ③ RCM20 のメッシュに対応するように 20km メッシュの月平均値を求め、 T_0 とする。
- ④ RCM20 の 20 年間のメッシュ値を月別に平均し、気温減率（ $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ）で標高補正し、標高 0m のデータセットを作成し、 T_c とする。
- ⑤ T_0 と T_c を比較して、月別のバイアス補正值 $\Delta T = T_0 - T_c$ を求める。
- ⑥ 将来予測値にも同様のバイアスがあると考え、同様のバイアス補正值を用いて一律に補正する。なお、月別のバイアス補正值をその月に含まれる日データ全てに当てはめる。
- ⑦ ⑥で得られた 20km メッシュ値の日データについて、 1km メッシュの標高によって気温減率（ $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ）で補正し、 1km メッシュの日データを作成する。

以上の手順によってバイアスを補正し、ダウンスケールした結果を図-5 に示す。図は全て年平均気温を表し、左は今回提案した RCM20 をダウンスケールした結果、右は 1998～2001 年の実測値を標高補正し Kriging 法で空間補間した結果である。図を見ると、今回提案した手法と実測値から作成したものの分布は近いものとなっていて、RCM20 出力値のバイアス補正、ダウンスケール後の再現性は良好である。よって、今回用いたバイアス補正とダウンスケール手法により、RCM20 の出力値を補正、空間補間して流出計算を行う。

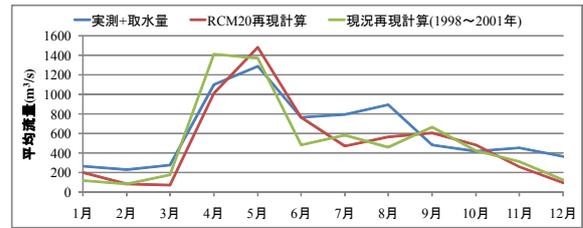


図-7 流出計算の結果(月別平均流量) (石狩大橋地点)

b) 降水量

降水量も気温と同様に標高依存性があると考え、同じ手法を試みたが、対象とした観測所は標高 5～400m の地点に多く、標高の高い地域のデータ数が少ない上に欠測が多いので明確な標高依存性を得ることができなかった。

今回は、降水量は補正を行わずに 1km メッシュから最も近い RCM20 のメッシュの値をそのまま使うこととした。降水量は 1km メッシュ毎に相対湿度を用いた雨雪判別式⁷⁾により臨界温度 T_c を計算し、降雨か降雪か判別して計算を行う。降水量の分布図を図-6 に示す。

5. 計算結果と分析

(1) RCM20 データによる再現計算と実測値との比較

RCM20 データを用いて水文諸量を再現計算し、実測値との比較からダウンスケール手法の妥当性を考える。計算に用いた値は、気温、降水量は RCM20 の 1981～2000 年の日データを同一日で平均し、前章で行った補正手法に従ってデータを作成した。その他の気象要素は年変動に対する感度が小さいとし、1998 年の観測値から作成した日データを使用した。実測流量（1981～2000 年の同一日の平均値）に灌漑用水の最大取水実績量を加算した結果と、RCM20 再現計算と現況再現計算（1998～2001 年）の日単位出力値を月平均した結果を図-7 に示す。ここで、最大取水実績量は取水記録より水利権量の 72.3% と推計される。図より 7、8 月で実測に比べて過少となっているが、波形は似たような結果となった。なお、7、8 月の誤差要因は取水量を過大設定していると考えられるため、今後実績取水量の把握が必要と考えられる。

(2) 将来予測計算の条件設定

将来の水循環の変化を予測するために、2 つのケースで計算を行った。1 つは、RCM20 の将来予測値を用いた計算（RCM20 感度計算）である。メッシュデータの作成は前節の再現計算と同様に行った。もう 1 つは、気温上昇のみを考慮した計算¹⁾（気温感度計算）である。ここでは 1998～2001 年の観測値から作成したデータを用いて、2050 年に $+1.8^{\circ}\text{C}$ 、2100 年に $+4.4^{\circ}\text{C}$ の気温上昇を年間一律で与えて計算を行った。

(3) 将来予測計算結果の分析

RCM20 感度計算と気温感度計算の流域水収支を表-3 に、水収支の変化を表-4 に示す。

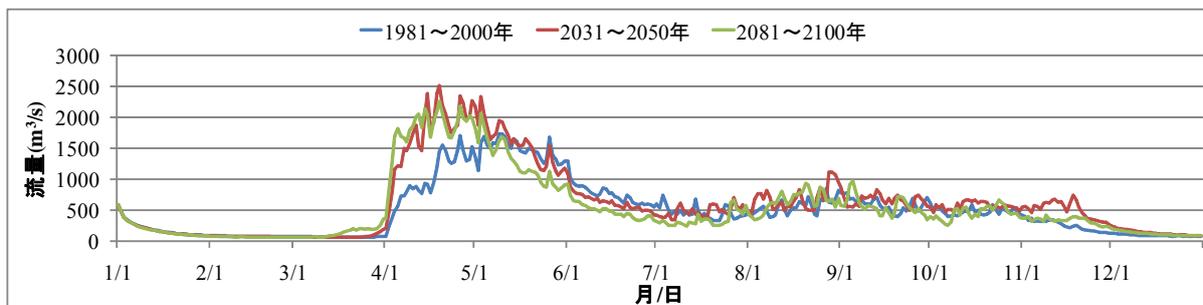


図-8 RCM20 感度計算による流量の変化予測結果 (石狩大橋地点)

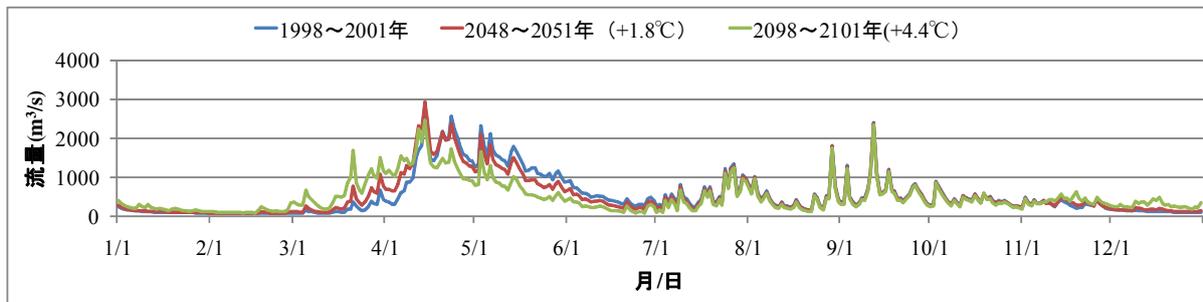


図-9 気温感度計算による流量の変化予測結果 (石狩大橋地点)

表-3 流域水収支と平均気温

単位はmm/yr	降雨量	降雪量	蒸発散量	流出高	平均気温(°C)
RCM20(2000年)	1056	650	743	963	5.0
RCM20(2050年)	1375	728	826	1276	6.8
RCM20(2100年)	1236	577	836	977	8.0
1998~2001年再現	1012	767	518	1262	5.2
気温上昇(2050年)	1026	753	551	1228	7.0
気温上昇(2100年)	1101	678	603	1176	9.6

表-5 月別平均流量 (単位はm³/s)

月	RCM20			気温上昇のみ		
	2000年	2050年	2100年	現況	(+1.8°C)	(+4.4°C)
1月	199	194	193	115	125	205
2月	81	75	73	81	86	135
3月	71	78	139	179	318	649
4月	1010	1723	1793	1419	1582	1385
5月	1482	1574	1281	1369	1117	735
6月	765	639	498	480	357	228
7月	470	484	351	581	526	474
8月	563	688	645	458	437	411
9月	604	661	570	669	650	623
10月	486	570	461	422	410	389
11月	262	510	337	310	332	397
12月	96	140	126	125	153	295
年平均	509	613	540	519	509	495

まず、降雨量と降雪量については、RCM20 感度計算結果では、2050 年に 4 章で述べた降水量の増加が降雨量、降雪量両方に表れている。2100 年では気温が上昇したことによって、降雪量が 11%減少している。

2050 年の気温上昇量は年平均で+1.8°Cで RCM20 と気温上昇の場合ともに同じである。しかし、蒸発散量の増加率には 5%の差があった (RCM20 の場合で+11%, 気温上昇の場合で+6%)。本解析では大気~地表面の熱収支より蒸発散量を算出するので、年間一律で気温上昇した場合に比べ、気温の地域、季節変化に伴い潜熱フラックスが変化し、蒸発散量が変動したと考えられ、それによって結果の差が現れたと考えられる。

次に、流量の変化について考察する。図-8 は RCM20 感度計算を行った結果で、図-9 には気温感度計算の 4 年間の同一日の平均流量を表している。対象箇所は、石狩

表-4 流域水収支の変化率と気温上昇量

変化率	降雨量	降雪量	蒸発散量	流出高	気温上昇量(°C)
RCM20(2050年)	1.30	1.12	1.11	1.33	+1.8
RCM20(2100年)	1.17	0.89	1.12	1.01	+3.0
気温上昇(2050年)	1.01	0.98	1.06	0.97	+1.8
気温上昇(2100年)	1.09	0.88	1.17	0.93	+4.4

(変化率: RCM20 は RCM20(2000 年)を基準とした値、
気温上昇は 1998~2001 年再現を基準とした値)

表-6 月別平均流量の変化率

月	RCM20		気温上昇のみ	
	2050年	2100年	(+1.8°C)	(+4.4°C)
1月	0.98	0.97	1.09	1.78
2月	0.92	0.90	1.06	1.67
3月	1.10	1.96	1.77	3.62
4月	1.71	1.77	1.12	0.98
5月	1.06	0.86	0.82	0.54
6月	0.84	0.65	0.74	0.47
7月	1.03	0.75	0.90	0.82
8月	1.22	1.15	0.95	0.90
9月	1.10	0.94	0.97	0.93
10月	1.17	0.95	0.97	0.92
11月	1.95	1.29	1.07	1.28
12月	1.46	1.31	1.23	2.37
年平均	1.20	1.06	0.98	0.95

(変化率: RCM20 は RCM20(2000 年)を基準とした値、
気温上昇は 1998~2001 年再現を基準とした値)

大橋地点とする。図-8、図-9 ともに 4 月から 5 月にかけての流量の増加、融雪期後期の流量減少が見られ、徐々に融雪のピークが早まっていく結果となった。また、表-5 に月別の平均流量を、表-6 に月別の平均流量の変化率を示す。変化率は、それぞれ RCM20 感度計算の結果は RCM20 の 2000 年の流量を、気温感度計算の結果は現況再現の流量を基準とした値である。RCM20 感度計算の結果は 2000 年に比べ、2050 年、2100 年ともに年平均流量は増加しているが、気温感度計算の結果は減少している。一方、融雪期である 3~6 月の流量を比較すると、両結果ともに、3~4 月に増加、6 月に減少が見られた。以上の結果より、気象変化による降水量の変化や気象要素の空間分布を考慮した将来予測でも、気温感度計算の結果と同様に、融雪期の早期化や融雪流出後期の流量減少を引き起こすことが確認された。

表-7 石狩川流域の水利用内訳 (年最大水利権量の百分率)

発電	かんがい	鉱工業	水道	その他
64.3	32.7	1.7	1.0	0.3

6. 水資源への影響

前章で示した流量の変化が石狩川流域内の水利用に与える影響について検証するために、現在の石狩川流域内の水利用状況を整理し、特に影響が出ると予想される灌漑用水について影響を評価した。

石狩川流域内の水利用の内訳を表-7に示す。内訳では、発電と灌漑で全体の約97%を占めている。灌漑に関して見れば、石狩川流域内の灌漑用頭首工の多くは5月中旬の代掻き期と7月上旬に冷害対策として行われる深水灌漑期に水利権量が多くなっていることが確認された。

図-10に灌漑期間(4~9月)の流量(前後5日平均)と石狩大橋までの灌漑用水の最大取水量の日単位の比較を図-11に月単位での水利権量と流出量の比較を示す。図-10を見ると、全期間ともに7月の河川流量は少なく、特に2100年では6月中旬から約1ヶ月間は水利権量を下回っている。また月単位で流出量を比較しても2100年の7月は他期間に比べて少ない。これらより、将来、融雪流出後期の深水灌漑で支障を期す可能性が示唆された。

7. まとめ

本報告で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 気象庁・気象研究所の地域気候モデル(RCM20)の気温の再現結果と気象観測値を比較し、月別平均毎にモデルバイアスを検出し、補正を行った。
- 2) バイアス補正を行った気温を標高差によりダウンスケーリングを行った。その結果、平均気温の分布を概ね再現することができた。
- 3) RCM20の再現結果、近未来予測値、21世紀末予測値を用いて、石狩川流域の水収支を試算した。その結果、気温上昇のみを考慮した結果と同様に融雪流出後期の流量減少が見られた。
- 4) 石狩川流域内の水利用状況を整理し、将来の河川流量の試算結果と比較した。融雪流出後期の流量減少と水需要期間(深水灌漑期)が重複し、計画通りの取水を行うと、水不足になる可能性が示唆された。

以上のような積雪地域の水不足へのリスクを回避し、適応していくために、現在の水利用の実態をより正確に把握し、総合的な水管理方策の検討を行っていくことが望ましい。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、気象庁地球環境・海洋部気候情報課からは地域気候モデル(RCM20)を用いたSRESシナリオA2による日本の気候変化予測結果を提供いただいた。また、北海道開発局石狩川開発建設部

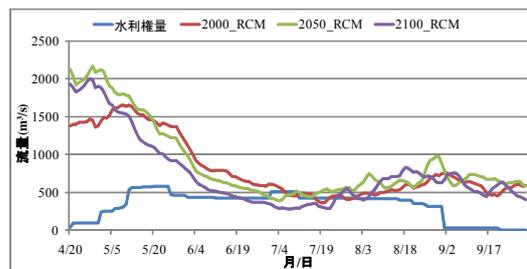


図-10 灌漑期間の水利権量と日別流量の比較 (石狩大橋)

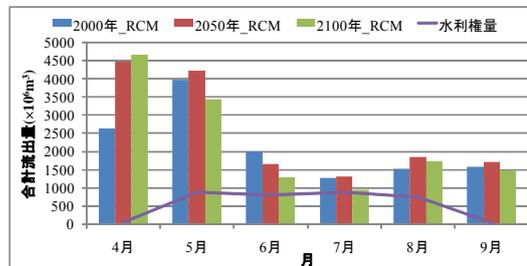


図-11 灌漑期間の取水量と月別流出量の比較 (石狩大橋)

計画課からは石狩川の利水関係の情報を提供いただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 川村一人, 中津川誠, 臼谷友秀: 気候変動が積雪寒冷地流域の水利用へ及ぼす影響の推定, 水文・水資源学会 2009年度研究発表会要旨集, pp.134-135, 2009.
- 2) 和田一範, 村瀬勝彦, 富澤洋介: 地域気候モデルを用いた地球温暖化に伴う洪水・渇水リスクの評価に関する考察, 水工学論文集, 第49巻, pp.493-498, 2005.
- 3) 藤原洋一, 大出真理子, 小尻利治, 友杉邦雄, 入江洋樹: 地球温暖化が利根川上流域の水資源に及ぼす影響評価, 水工学論文集, 第50巻, pp.367-372, 2006.
- 4) 立川康人, 滝野晶平, 市川温, 椎葉充晴: 地球温暖化が最上川・吉野川流域の河川流況に及ぼす影響について, 水工学論文集, 第53巻, pp.475-480, 2009.
- 5) 財団法人 北海道河川防災研究センター, 石狩川流域ランドスケープ情報, 1998.
- 6) 臼谷友秀, 中津川誠, 工藤啓介: 石狩川流域における水循環の定量化, 北海道開発土木研究所月報 No.628, pp.18-34, 2005.
- 7) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 8) 口澤寿, 中津川誠: 熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定, 北海道開発土木研究所月報, No.588, pp.19-38, 2002.
- 9) 本山秀明, 小島賢治: 積雪深変化の推定(乾雪の場合), 低温科学, 物理編, 44, pp.15-25, 1985.
- 10) 山口甲, 新庄興, 三田村一弘, 上野順也: 豊平川の生産土砂量について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第55号, pp.268-271, 1999.
- 11) 中津川誠, 濱原能成, 星清: 積雪変化を考慮した長期流出計算, 水工学論文集, 第47巻, pp.157-162, 2003.

(2009.9.30 受付)